УСТОЙЧИВОСТЬ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ РАЗНОСТНОГО СИГНАЛА МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ

Воловик Андрій Юрійович
кафедра радіотехніки
Вінницький національний технічний університет
voland@vntu.edu.ua

Аннотация *– В данной работе рассмотрена задача обеспечения устойчивости формирователей разностного сигнала модельно-ориентированных систем диагностики. Означено, что ошибки моделирования,совместно с присутствующие в разностном сигнале возмущениями, составляют основную трудность при проектировании устойчивой системы обнаружения и локализации неисправностей. Проанализированы основные варианты существующих решений этой проблемы.*

Ключевые слова*: модельно-ориентированные системы диагностики, формирователь разностного сигнала, устойчивость динамической системы.*

1. ВСТУПЛЕНИЕ

Модельно-ориентированные методы обнаружения, локализации и идентификации неисправностей основаны на интуитивной идее замены физического резервирования математической моделью. Математическая модель работает параллельно с действующим объектом, на их входы подаются одни и те же входные сигналы. Общеизвестно, что методы обнаружения неисправностей, ориентированные на математическую модель являются более эффективными, чем сигнально-ориентированные методы, так как в этом случае имеется большее количество априорной информации о системе [1].

Естественно, что надежность систем обнаружения и локализации неисправностей должна быть более высокой, чем контролируемой системы. Поскольку модельно ориентированные системы диагностики используют математическую модель объекта контроля, становится очевидным – чем лучше математическая модель представляет динамические свойства системы, тем лучше будет качество и достоверность результатов диагностики. Однако в системе всегда присутствуют ошибки, связанные с неполной адекватностью модели, наличием разнообразных возмущений и шумов [2]. Следовательно, требуется обеспечивать устойчивость диагностических систем, по отношению к указанным факторам. Устойчивость диагностической системы означает, прежде всего, высокую избирательную чувствительность к неисправностям даже несмотря на присутствие непредсказуемых изменений. Обычно, изменения параметров системы и возмущения воздействуют на реальный процесс непредсказуемо, поэтому весьма трудно обеспечить одновременно высокую чувствительность к неисправностям и высокую нечувствительность (инвариантность) к ошибкам моделирования и возмущениям. Поскольку в основе модельно ориентированных систем диагностики лежит процесс формирования разностного сигнала, то и неисправности, и ошибки моделирования вместе с возмущениями в равной мере воздействуют на формирователь разностного сигнала и различить эти эффекты весьма трудно. Поэтому задача проектирования устойчивой системы функциональной диагностики сводится к синтезу такой структуры формирователя разностного сигнала, которая делала бы его нечувствительным к указанным неопределенностям, одновременно сохраняя высокую чувствительность к неисправностям. Устойчивость системы диагностики считается обеспеченной, если указанное свойство сохраняется в полном рабочем диапазоне контролируемой системы [3].

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ РАЗНОСТНОГО СИГНАЛА

В общем случае, задача обеспечения устойчивости диагностических систем, должна включать математическое описание всех видов ошибок моделирования, которые наиболее часто встречаются на практике с учетом их особенностей воздействия на систему. Следовательно, обобщенная математическая модель в пространстве состояний будет иметь вид:

$$\mathbf{x}'(t)=(\mathbf{A}+\Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(t)+(\mathbf{B}+\Delta\mathbf{B})\mathbf{u}(t)+\mathbf{E}_1\mathbf{d}(t)+\mathbf{R}_1\mathbf{f}(t), \quad (1)$$
$$\mathbf{y}(t)=(\mathbf{C}+\Delta\mathbf{C})\mathbf{x}(t)+(\mathbf{D}+\Delta\mathbf{D})\mathbf{u}(t)+\mathbf{E}_2\mathbf{d}(t)+\mathbf{R}_2\mathbf{f}(t) \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния системы; $\mathbf{y}(t)$ – выходной вектор системы; $\mathbf{u}(t)$ – управляющее воздействие; $\mathbf{d}(t)$ – неизвестный вектор входных возмущений (матрицы $\mathbf{E}_1$ и $\mathbf{E}_2$ считаются известными); $\mathbf{f}(t)$ – вектор неисправностей (матрицы $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ считаются матрицами входов, относящихся к неисправностям, и описывают процесс влияния неисправностей на контролируемую систему). Матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ – соответствующие системные матрицы, а $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{B}$, $\Delta\mathbf{C}$, $\Delta\mathbf{D}$ являются их параметрическими ошибками и представляют собой ошибки моделирования. В частотной области выражению (2) соответствует соотношение «вход-выход» следующего типа:

$$\mathbf{y}(s)=[\mathbf{G_u}(s)+\Delta\mathbf{G_u}(s)]\mathbf{u}(s)+\mathbf{G_d}(s)\mathbf{d}(s)+\mathbf{G_f}(s)\mathbf{f}(s) \quad (3)$$

где $\mathbf{G_d}(s)\mathbf{d}(s)$ представляет воздействие возмущений $\mathbf{G_d}(s)=\mathbf{E}_2+\mathbf{C}(s\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{E}_1$, а $\Delta\mathbf{G_u}(s)$ используется для описания ошибок моделирования. Составляющие $\mathbf{G_d}(s)\mathbf{d}(s)$ и $\Delta\mathbf{G_u}(s)\mathbf{u}(s)$ вместе представляют ошибки моделирования. В частотной области разностный сигнал можно представить следующим выражением:

$$\mathbf{r}(s)=\mathbf{H_y}(s)\mathbf{G_f}(s)\mathbf{f}(s)+\mathbf{H_y}(s)\Delta\mathbf{G_u}(s)+\mathbf{H_y}(s)\mathbf{G_d}(s)\mathbf{d}(s) \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что и неисправности и ошибки моделирования совместно с возмущениями присутствуют в разностном сигнале, что и составляет основную трудность проектирования устойчивой системы обнаружения и локализации неисправностей.

Проблема устойчивости относительно ошибок моделирования, представленных составляющей $\Delta\mathbf{G_u}(s)$, является одной из самых сложных. К настоящему времени известны два главных подхода к решению этой задачи: первый основан на применении процедуры оценивания неопределенности, входящей в разностный сигнал, и известен как активный метод обеспечения устойчивости системы обнаружения и локализации неисправностей [4]; второй основан на применении адаптивного порога на стадии принятия решений, и известен как пассивный метод обеспечения указанной устойчивости.

Активный путь достижения устойчивости к ошибкам моделирования предполагает структурную аппроксимацию неопределенности, т.е. ошибки моделирования приближенно представляют в виде некоего возмущения, которое можно описать выражением:

$$\Delta\mathbf{G_u}(s)]\mathbf{u}(s)\approx\Delta\mathbf{G_{d1}}(s)\mathbf{d_1}(s) \quad (5)$$

где $\mathbf{d_1}(s)$ является неизвестным вектором, а $\mathbf{G_{d1}}(s)$ представляет собой оценку матричной передаточной функции. При применении указанной структурной аппроксимации формирование разностного сигнала происходит таким образом, что устойчивость схем обнаружения и локализации неисправностей к ошибкам моделирования является достижимой. Поскольку здесь делается попытка представления разностного сигнала в виде устойчивого сигнала, то метод получил название активного. Если предположить, что параметрические ошибки можно аппроксимировать выражениями:

$$\Delta\mathbf{A}\approx\sum a_i\mathbf{A_i};\ \Delta\mathbf{B}\approx\sum b_i\mathbf{B_i};\ \Delta\mathbf{C}\approx\sum c_i\mathbf{C_i};\ \Delta\mathbf{D}\approx\sum d_i\mathbf{D_i} \quad (6)$$

где $\mathbf{A_i}$, $\mathbf{B_i}$, $\mathbf{C_i}$, $\mathbf{D_i}$ являются известными матрицами и имеют такую же размерность, как и матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$, а a_i, d_i, c_i, d_i являются скалярными вели-чинами. В этом случае ошибки моделирования могут быть аппроксимированы выражениями:

$$\mathbf{E}_1\mathbf{d}_1(t)=\Delta\mathbf{A}\mathbf{x}(t)+\Delta\mathbf{B}\mathbf{u}(t)=\left[\mathbf{A}_1\ldots\mathbf{A}_N\ \ \mathbf{B}_1\ldots\mathbf{B}_N\right]\begin{bmatrix}a_1\mathbf{x}(t)\\ a_N\mathbf{x}(t)\\ b_1\mathbf{x}(t)\\ b_N\mathbf{x}(t)\end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E_2}\mathbf{d}_2(t)=\Delta\mathbf{C}\mathbf{x}(t)+\Delta\mathbf{D}\mathbf{u}(t)=\left[\mathbf{C}_1\ldots\mathbf{C}_N\ \ \mathbf{D}_1\ldots\mathbf{D}_N\right]\begin{bmatrix}c_1\mathbf{x}(t)\\ c_N\mathbf{x}(t)\\ d_1\mathbf{x}(t)\\ d_N\mathbf{x}(t)\end{bmatrix}. \quad (8)$$

Соответствующее преобразование Лапласа будет иметь вид:

$$\mathbf{G_d}(s)\mathbf{d}(s)=\mathbf{E_2}\mathbf{d_2}(s)+\mathbf{C}(s\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{E_1}\mathbf{d_1}(s) \quad (9)$$

Улучшения устойчивости диагностических схем к разнообразным неопределенностям также можно достичь на стадии принятия решений. На практике изменения параметров, возмущения и шумы в редких случаях удовлетворяют условиям устойчивости разностного сигнала. В связи с этим необходимо предпринять меры к повышению устойчивости не только в процессе формирования разностного сигнала, как было рассмотрено выше, но и на этапе принятия решений. В этом случае говорят о пассивной устойчивости систем функциональной диагностики [5]. Такая форма устойчивости, используется, как правило, при наличии очень ограниченной информации о контролируемой системе. Целью этой операции является уменьшение количества ложных срабатываний и пропусков, обусловленных влиянием ошибок моделирования и неизвестных возмущений на разностный сигнал. На практике разностный сигнал никогда строго не равен нулю, даже в случае отсутствия неисправностей. Как правило, пороговое испытания проводятся на заключительной стадии формирования разностного сигнала. Обычно, значение пороговой величины выбирается несколько большим, чем самая большая амплитуда разностного сигнала при отсутствии неисправностей. Наименьшая неисправность, которую можно обнаруживать представляет собой неисправность, которая так изменяет функцию разностного сигнала, что происходит простое превышение заданного порога. Любая неисправность, которая вызывает изменения разностного сигнала, которые не превышают этого значения, считаются необнаруженной. Таким образом, здесь под обеспечением устойчивости, подразумевается как уменьшение порогового значения при отсутствии неисправностей и его сохранение (либо даже увеличение) при появлении неисправности.

Выбор подходящего порогового уровня вовсе непростая задача, как кажется на первый взгляд. В случае фиксированного порога при его завышенном значении имеем уменьшение чувствительности к неисправностям, если же пороговый уровень занижен, то возрастает количество ложных срабатываний. Строгое обоснование выбора порога достаточно деликатная проблема. Несомненно, что порог надо выбирать оптимально. В работе [6] показано, что этого можно достичь на основе теории марковских процессов. Определение указанных порогов изучалось также во временной области [7] на основе операций с нормами векторов и матриц.

При большом динамическом диапазоне амплитуд сигналов неисправностей пороговые величины также будут существенно изменяться, так, что в итоге невозможно будет найти приемлемый фиксированный порог, удовлетворяющий условиям минимизации ошибок первого рода (ложных тревог) и второго рода (пропусков сигналов неисправности). Решение состоит в применении переменных, т.е. адаптивных порогов [8]. Здесь величина порога определяется законом управления, который зависит от шумов и свойств сигнала неисправности в контролируемой системе. Применение адаптивного порога иллюстрируется рисунком 1, где показана типичная форма адаптивного порога в случае прямого оценивания разностного сигнала. Определенный интерес представляет вопрос описания аналитической зависимости, которая бы определяла форму изменяющегося порога. В [8] для этой цели использовал эмпирически адаптивный подход.

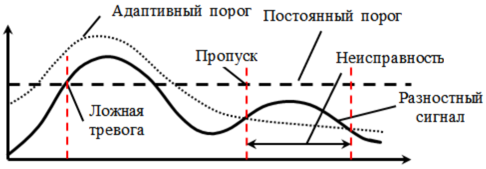

Рисунок 1 – Применение адаптивного порога

Проведенные исследования показали, что форму изменения адаптивного порога можно рассчитывать аналитически с помощью определенной систематической процедуры, что представляет собой инновационный инструмент для анализа и синтеза устойчивых систем обнаружения и локализации неисправностей. Предположим, что неопределенности, проявляющиеся в разностном сигнале, обусловлены только ошибками моделирования, т.е. разностный сигнал при отсутствии неисправностей можно описать соотношением:

$$\mathbf{r}(s)=\mathbf{H}_y(s)\Delta\mathbf{G}_u(s)\,\mathbf{u}(s). \tag{10}$$

Далее предположим, что ошибки моделирования находятся в пределах $\pm\delta$, $\|\Delta\mathbf{G}_u(j\omega)\|\leq\delta$.

В этой ситуации, частотный отклик при отсутствии неисправностей будет ограничен пределами:

$$\|\mathbf{r}(j\omega)\|=\|\mathbf{H}_y(j\omega)\Delta\mathbf{G}_u(j\omega)\mathbf{u}(j\omega)\|\leq \|\mathbf{H}_y(j\omega)\mathbf{u}(j\omega)\|\|\Delta\mathbf{G}_u(j\omega)\|\leq c\|\mathbf{H}_y(j\omega)\mathbf{u}(j\omega)\|. \tag{11}$$

Следовательно, величина адаптивного порога $\mathbf{T}(t)$, который формируется линейной динамической системой, будет следующей

$$\mathbf{T}(s)=\delta\mathbf{H}_y(s)\mathbf{u}(s). \tag{12}$$

Нетрудно увидеть, что порог $\mathbf{T}(t)$ не является фиксированным, так как зависит от входного сигнала, и таким образом становится адаптивным при работающей системе. Неисправность, при этом, фиксируется при выполнении неравенства $\|\mathbf{r}(t)\|>\|\mathbf{T}(t)\|$.

3. ВЫВОДЫ

1. Несмотря на то, что методы развязки разностного сигнала от возмущений являются предметом активных исследований, к настоящему времени их эффективность на практике используется не в полной мере. Аппроксимация ошибок моделирования и других неопределенных факторов в виде составляющих возмущений представляется пока единственным практическим путем обеспечения устойчивости.

2. Комбинация активных и пассивных методов обеспечения устойчивости разностного сигнала к указанным неопределенностям может быть эффективным инструментом достижения устойчивости систем обнаружения и локализации неисправностей в практических ситуациях.

3. Успех в достижении устойчивости в схемах функциональной диагностики, в значительной мере, зависит от точности и правильности выбора математической модели контролируемого процесса. Следовательно, при решении задач, связанных с устойчивостью диагностических схем к разнообразным неопределенностям, вопросу адекватности и точности процесса моделирования должно быть уделено самое пристальное внимание.

4. ЛИТЕРАТУРА

1 A. Volovyk, V. Kychak, D. Kudriavtsev, D. Havrilov, A. Yarovyi and L. Krylik. Simultaneous Estimation in Linear Dynamic Systems with the Indeterminate Structure Disturbances, 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 651-655, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088884.

2 A.Yu. Volovyk, V.M. Kychak. Detection filter method in diagnostic problems for linear dynamic systems. Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia, 2021, Iss. 84, pp. 30–39 DOI: https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.84

3 А.Вилски, А.Банвенист. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: Пер. с англ. Под ред. М. Бассвиль, А. Банвениста. – М.: Мир, 1989.– 278 с.

4 Chen, J. and Patton, R. J. A re-examination of fault detectability and isolability in linear dynamic systems, *Preprints of the IFAC Sympo. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes: SAFEPR0CESS '94,* Espoo, Finland, 1994 (Vol.2) pp. 590-596.

5 Patton, R. J. and Chen, J. Advances in fault diagnosis using analytical redundancy. I*EE Colloquium on "Plant Optimisation for Profit (Integrated Op pp. 6/1 - 6/12. TEE Colloquium Digest-erations Management and Control)"*, 1993 No. 1993/019.

6 Walker, B. Fault detection threshold determination using markov theory, *in* R. J. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark (eds), *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Application,* Prentice Hall, 1989 chapter 14, pp. 477-508.

7 Seliger, R. and Frank, P. M. . Robust residual evaluation by threshold Selection and a performance index for nonlinear observer-based fault diagnosis, *Proc. of Int. Conf. on Fault Diagnosis: TOOLDIAG'93*, 1993, Toulouse, pp. 496-504.I.

8 Clark, R. N. (1989). State estimation schemes for instrument fault detection, in R. J. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark (eds), *Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application, Prentice Hall*, 1989, chapter 2, pp. 21-45.

DIFFERENCE SIGNAL SHAPERS STABILITY OF THE MODEL ORIENTED DIAGNOSTIC SYSTEMS

Andrii Volovyk
department of Radio engineering
Vinnytsia National Technical University
voland@vntu.edu.ua

Abstract — In this work the problem of ensuring stability of difference signal shapers of the model oriented diagnostic systems is considered. It is marked that modeling errors jointly, with present at a difference signal perturbations, make the main difficulty at design of the steady detection system and localization of faults. Basic versions of existing solutions of this problem are analyzed.

Key words: the model oriented diagnostic systems, the difference signal shaper, stability of a dynamic system.